

平行双隧洞台阶法开挖有限元模拟

黄仕伟, 陈崇坤*, 李彦璋

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年2月24日; 录用日期: 2023年3月16日; 发布日期: 2023年3月29日

摘要

本文通过COMSOL对平行双隧洞建立有限元模拟模型, 并对开挖的隧洞进行岩土力学承载力数值模拟, 分析对比平行双隧洞在上下台阶开挖过程中围岩的应力重分布规律、拱部沉降量、围岩应力、塑性区变化规律。通过分析这些重要参数, 结果表明: 拱顶上端土体厚度越大, 应力集中现象越明显; 上台阶的开挖会使得围岩产生应变和应力重分布, 但达到稳定后, 下台阶的开挖不会产生应力和应变的变化; 在斜坡内部开挖隧洞, 沉降量呈现先增加后减少, 再先增加后减少的趋势。

关键词

双隧洞, 台阶法, 有限元, COMSOL

Finite Element Simulation of Parallel Double Tunnel Excavation by Bench Method

Shiwei Huang, Chongkun Chen*, Yanzhang Li

College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 24th, 2023; accepted: Mar. 16th, 2023; published: Mar. 29th, 2023

Abstract

In this paper, the finite element simulation model of the parallel double tunnel was established by COMSOL, and the geotechnical mechanical bearing capacity of the excavated tunnel was numerically simulated. The stress redistribution law, arch settlement, surrounding rock stress and plastic zone variation law of the parallel double tunnel in the process of upper and lower step excavation were analyzed and compared. By analyzing these important parameters, the results show that the larger the soil thickness is, the more obvious the stress concentration phenomenon is. The excavation of the upper step will cause strain and the stress redistribution of the surrounding rock, but the excavation of the lower step will not cause stress and strain change after reaching stability. When the

*通讯作者。

tunnel is dug inside the slope, the settlement first increases, then decreases, then increases and then decreases.

Keywords

Double Tunnel, Bench Method, Finite Element, COMSOL

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于三车道以上的超大断面公路隧道，在施工穿越软弱破碎围岩段时，采用传统双侧壁导坑法施工步骤繁琐，其施工效率往往低下，工期时间较长，对于工期要求紧的项目来说，难以满足工期要求[1]。采用台阶法，施工步骤则会大大减少，其施工效率高于双侧壁导坑法，因此采用高效率的施工方法以提高软弱围岩段隧道施工效率，具有一定现实意义。

近年来，国家修建了大量高速公路，特别是在贵州高速公路总里程逐年增加，高速公路对线型要求较为严格，因此在山区修建高速公路时，遇到山岭时经常需要修建山岭隧道。目前，高速公路常常为双向六车道，为了保证车辆通行效率，修建隧道时不可避免地出现特大断面隧道。根据国际隧道协会(ITA)定义，隧道按断面分类如表 1。

Table 1. Tunnel section size classification

表 1. 隧道按断面大小分类

隧道分类	开挖面积
极小断面	2~3 m ²
小断面	3~10 m ²
中等断面	10~50 m ²
大断面	50~100 m ²
特大断面	>100 m ²

目前，高速公路隧道基本上断面面积均超过 100 m²，属于特大断面隧道。特大断面隧道，由于开挖断面大，在围岩条件相对较差的 V 级围岩段开挖时，围岩的稳定能力差，因此需要在施工过程中保证围岩不塌方，施工难度较大。严格采用短进尺、强支护手段能够维持围岩稳定，但施工进度相对较慢[2] [3] [4]。针对岩体应力分布特点及稳定性[5]，需要分析控制因素，在设计 and 建设过程中有效控制和管理围岩稳定性问题[6] [7] [8]，以确保地下工程的安全性和稳定性。

一般而言，围岩的应力调整过程可以分为以下过程：原始应力状态→开挖造成岩体临空后，临空面上径向应力消失，围岩应力向深部转移→及时进行支护，喷混凝土，施作系统锚杆，拱架等初期支护，围岩变形得到抑制→二次衬砌施工，围岩变形基本稳定。围岩在不能自我稳定时，将造成洞室大面积塌方，就需要采用一定的支护手段方能保证洞室稳定[5] [9]。

而且在隧道开挖后，受扰动而产生的应力重分布过程极其复杂，对于地质条件差、地应力高的软弱围岩，

其结构受力大小与受力特征对隧道结构安全极其重要[10]。故本文通过有限元模型的计算,分析大断面隧道采用双隧道台阶法施工时,隧洞围岩应力重分布后应力应变的情况,为实际工程的隧洞开挖提供参考。

2. 分析计算模型及参数

2.1. 计算模型

采用 COMSOL 有限元分析计算软件,本隧洞开挖模型采用二维模型,采用平面问题的求解方式。为避免边界范围对有限元计算精度的影响,坡脚至左边界的距离为坡高的 2.5 倍,坡顶到右边界的距离为坡高的 2.5 倍。模型的边界范围长为 160 m,高为 80 m,建立的模型如图 1 所示。计算模型采用三角形网格单元划分,网格划分后的模型如图 2 所示。模型共有 1005 个三角形单元,140 个边单元。模型底部采用固定约束,左右边界采用辊支承。

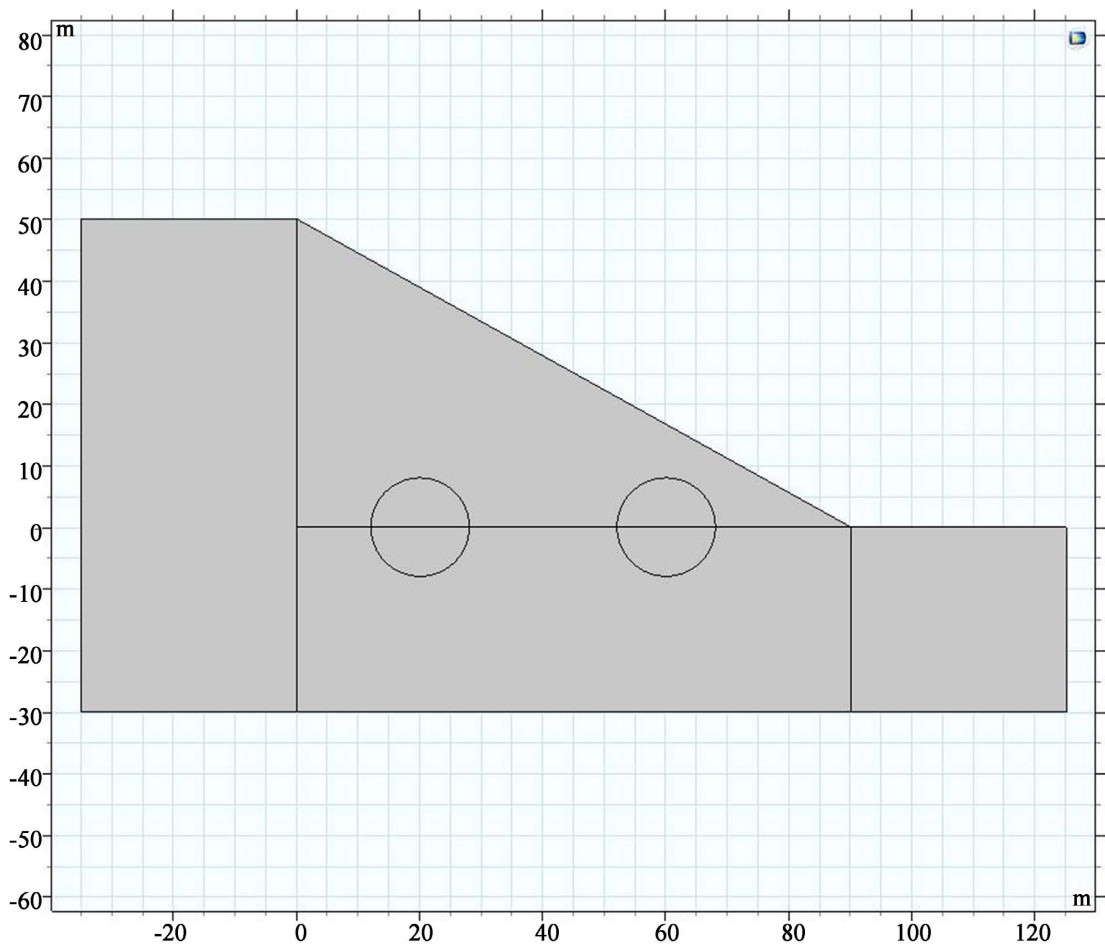


Figure 1. Parallel double tunnel excavation model

图 1. 平行双隧道开挖模型

2.2. 计算参数选取

在不受荷载作用的自由岩体中开挖出两个平行的圆形隧洞,土体高 80 m,坡面宽 90 m,隧洞直径为 16 m,两隧洞中心均距土体下端 30 m,左侧隧洞距土体左端 55 m,右侧隧洞距土体右端 65 m,两隧洞中心距离为 40 m。土体材料为线弹性材料,各向同性,杨氏模量取 12×10^6 ,泊松比取 0.495,密度取 2000

kg/m^3 ，内聚力为 130 kPa，内摩擦角为 30° ，这些参数都是参考现有工程参数，进行灵敏度分析，对参数进行比较取值。

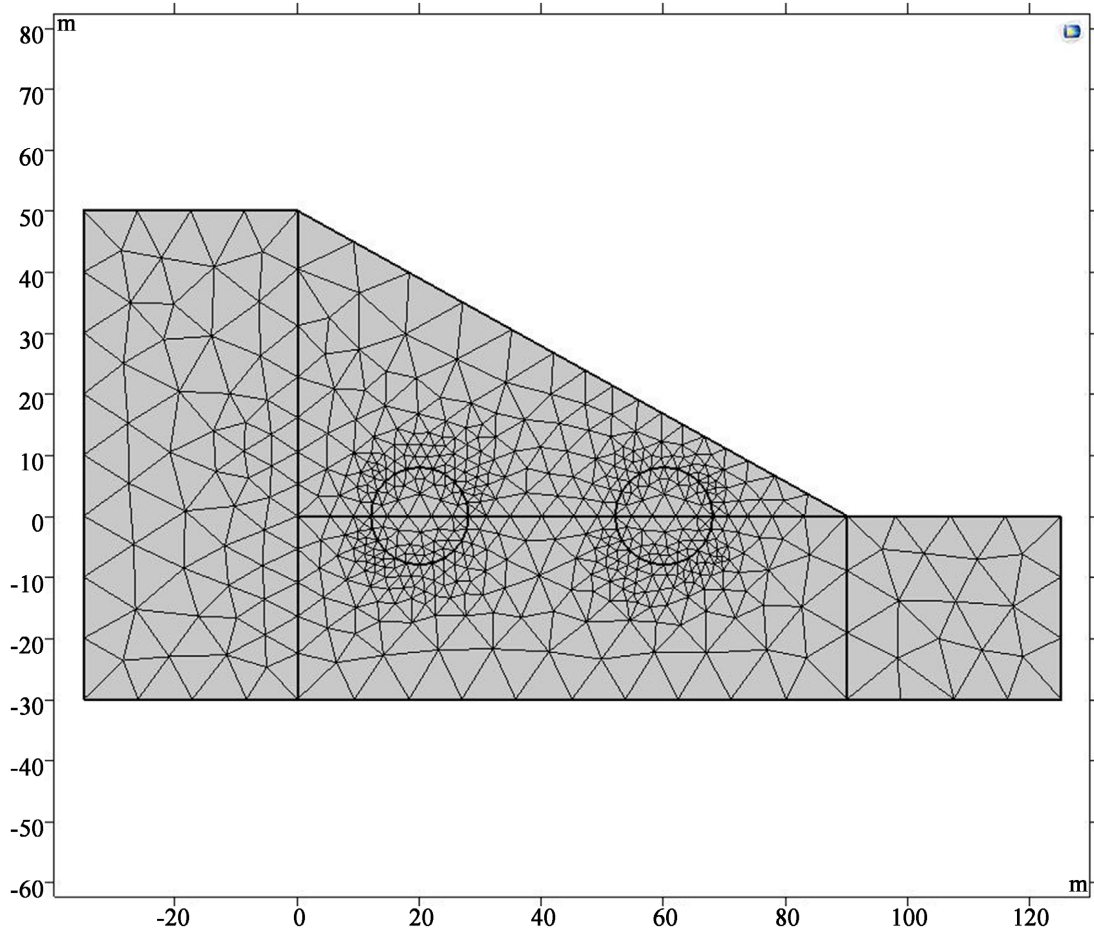


Figure 2. Grid division of parallel double tunnel excavation model
图 2. 平行双隧道开挖模型网格划分

2.3. 计算内容

本文主要进行三个步骤，一是先计算隧洞开挖前土体的应力状态；二是台阶法开挖上台阶后的应力应变状态及其所计算的弹塑性曲线；三是台阶法开挖下台阶后的应力应变状态及其所计算的弹塑性曲线。计算过程综合实际情况控制计算机精度，控制计算误差。

3. 计算结果分析

3.1. 应力分布分析

图 3(a)所示为模型原始应力图，岩体的原始应力状态下，坡面处由于侧向应力趋于零，实际上处于两向受力状态，而坡内逐渐变为三向应力状态。在坡脚处出现应力集中现象。图 3(b)为隧洞上台阶开挖后的应力分布图，由图可知，应力重分布以后，应力主要集中在开挖面的突变处，即为上台阶开挖处的脚部。从左右隧洞的对比可知，在隧洞上端的土体厚度越大，应力集中现象越明显，左侧隧洞的左脚部应力集中现象明显大于右脚部，而左隧洞的左右脚部应力均大于右侧隧洞的左脚部，并且由于右侧隧洞

的右脚部上端土体厚度较小，应力集中现象不明显。图 3(c)所示为隧洞下台阶开挖后的应力分布图，图 3(b)和图 3(c)的情况基本一致，但由于隧洞下台阶土体开挖后，应力集中处的应力无法向隧洞内侧发散，呈现向外侧土体发散应力，但隧洞侧壁应力大小及位置不变。故半断面形式的台阶法能够快速使得围岩应力重分布，短期内达到自稳。

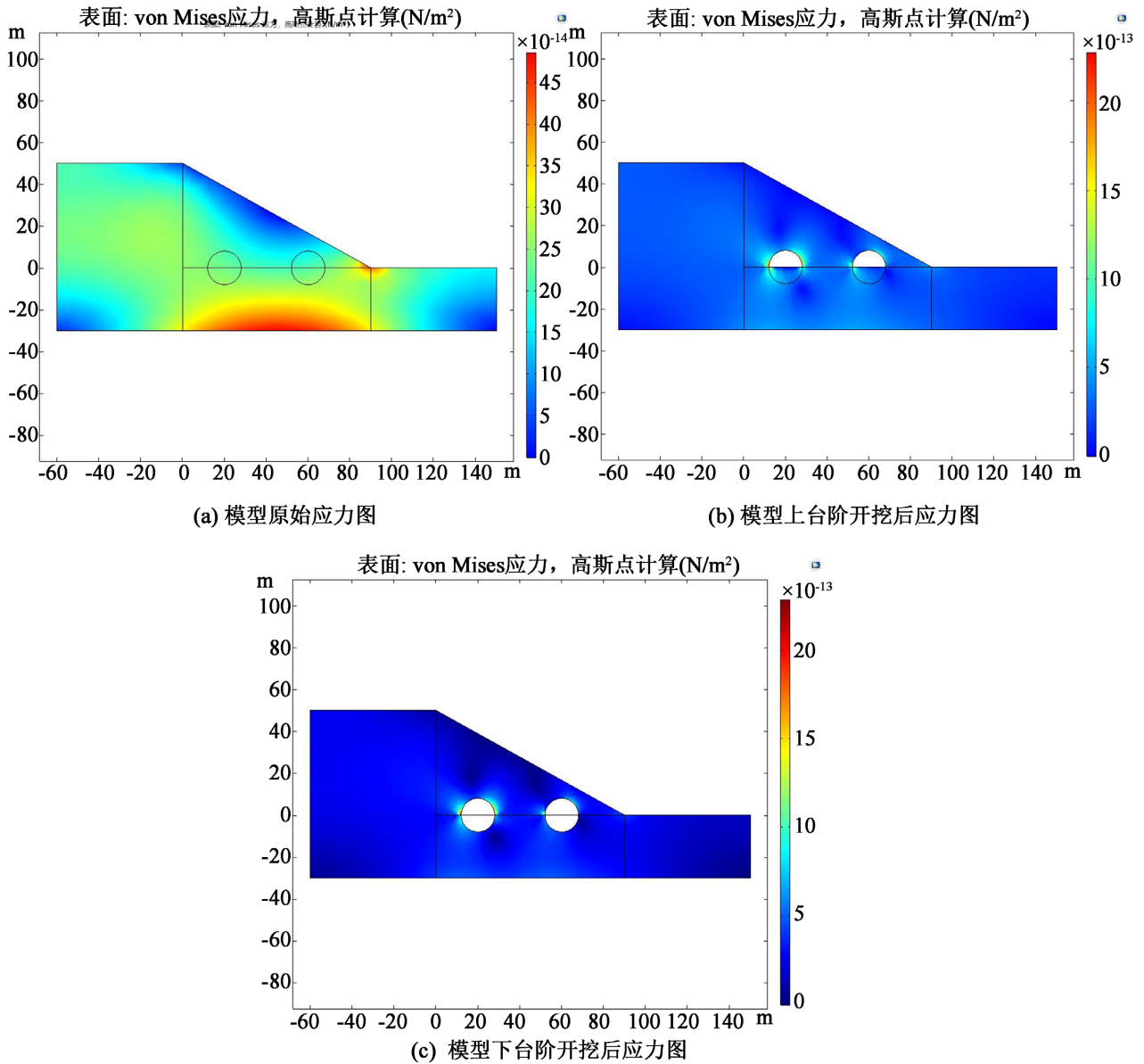


Figure 3. Stress diagrams of each stage
图 3. 各阶段应力图

3.2. 应变分布分析

图 4(a)所示为模型原始应变图，在土体的原始应力的作用下，应力沿土体传递应力，故坡面处的应变沿四周逐渐减少，在坡脚沿坡顶方向三分之一处达到最大应变，最大应变量约为 10×10^{-10} m。图 4(b)为隧洞上台阶开挖后的应变分布图，由图可知，在原始应变达到稳定后，两隧洞上台阶的开挖，使得上

台阶拱顶围岩失去下端土体的直接支撑,拱顶围岩沿坡肩方向产生应变,但应变量逐渐变小,最大应变量为 8×10^{-10} m。从左右隧洞的应变对比可知,左侧隧洞的应变明显大于右侧隧洞的应变,即约靠近坡脚的隧洞应变越小,应变传递方向与隧洞中心和坡脚连线之间的夹角越大;左侧隧洞下台阶的土体应变也明显大于右侧隧洞台阶应变。图 4(c)所示为隧洞下台阶开挖后的应力分布图,围岩不产生应变,这是因为由于上台阶的开挖产生的应力重分布使得围岩应变达到稳定状态,下台阶的开挖不再使得围岩产生应变,同时也不产生应力重分布,故整体均不产生应变。则上节应力分布情况与本节应变分布情况结论保持一致。

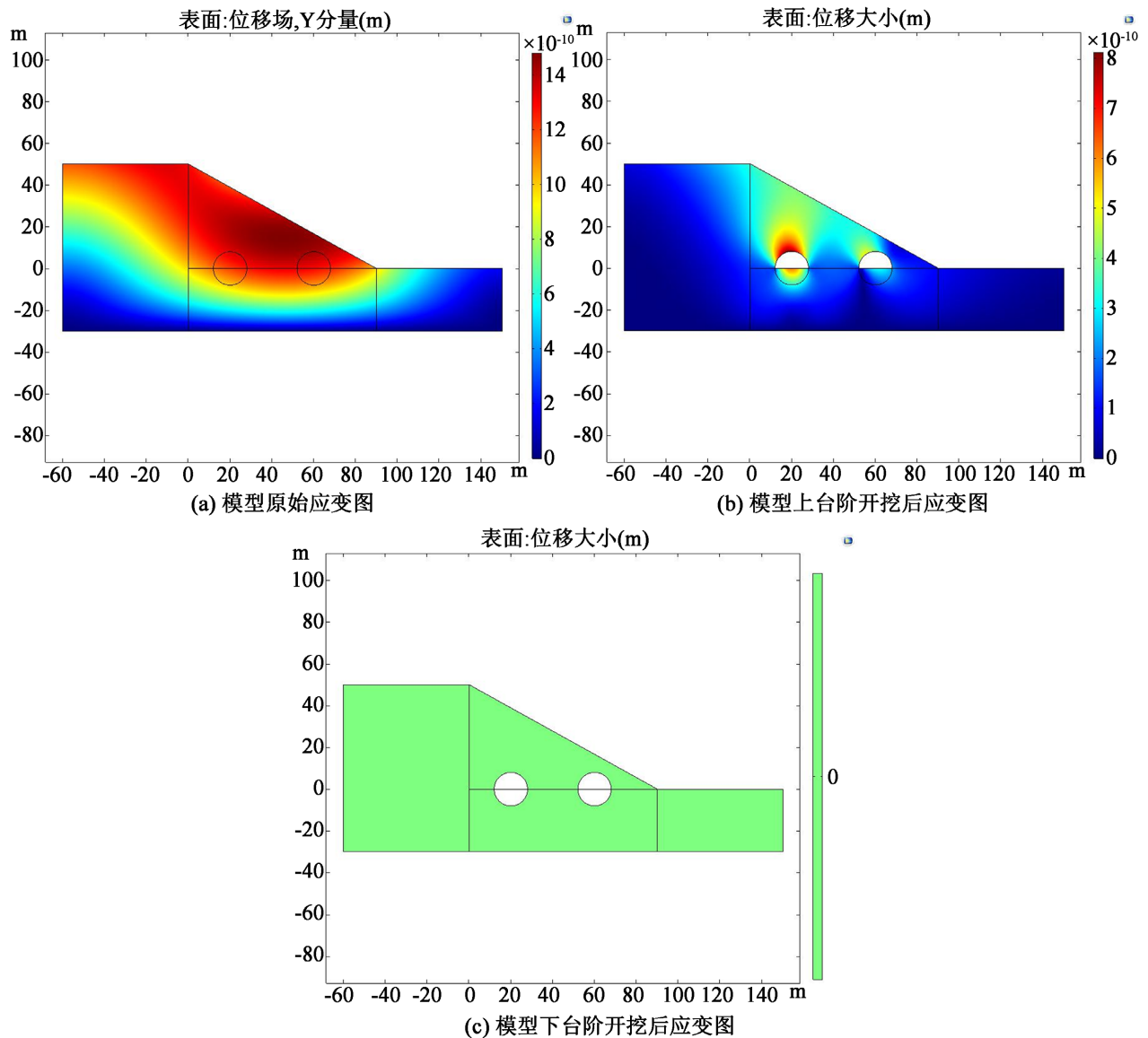


Figure 4. Strain diagrams of each stage

图 4. 各阶段应变图

3.3. 地表沉降量分析

图 5 所示为模型地表沉降曲线,由图可知,沉降量曲线呈现出随弧长的增加先下沉后挤出的趋势,

这是由于在土体自重和隧洞开挖拱顶有效应力减少,使得坡顶有效应力增大,土体下沉,随着斜坡到来,土体厚度减少,土体自重降低,有效应力逐渐减少,使得沉降量逐渐减少;由于坡脚承受的应力增大而挤压坡脚土体,故呈现坡脚土体产生向上的表面位移,随着应力向右侧土体扩散,挤压作用逐渐变小,使得表面土体沉降量变小。

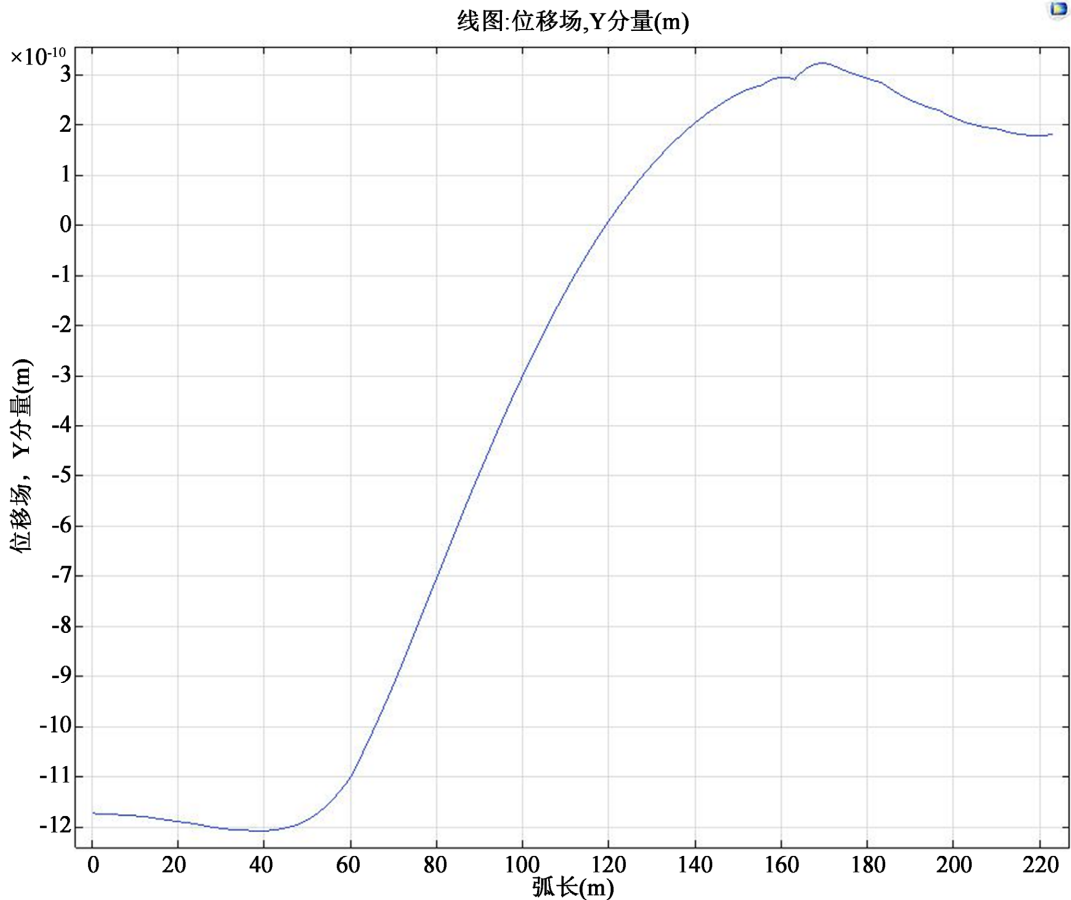


Figure 5. The surface subsidence curve
图 5. 地表沉降量曲线

4. 结论

本文通过对平行双隧洞台阶法开挖数值模拟分析,得到以下结论:

- 1) 在斜边坡下的台阶法隧洞开挖中,拱顶上端的土体厚度越大,隧洞脚部承受的应力越大,应力集中越明显,应力扩散方向为隧洞中心指向坡肩方向;
- 2) 台阶法施工在上台阶开挖应力重分布达到稳定后,下台阶的开挖不会再使围岩产生应变,这种快速应力重分布的施工方法能够大大提高施工效率,同时对围岩的物理力学性能有要求;
- 3) 在斜边坡下的台阶法隧洞开挖中,坡肩会产生向下沉降,随着坡体土体厚度的减少,沉降量会逐渐变小,到达坡脚处是会产生挤压作用而产生反向的隆起,随着离坡脚距离的增加而逐渐减弱。

参考文献

- [1] 王帅帅,毛锦波,张斌斌,等. 乌尉高速天山胜利隧道总体施工技术方案[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 55-68.

-
- [2] 陈二平. 既有大断面交叉洞室衬砌拆除控制及围岩稳定性研究[J]. 公路, 2022, 67(3): 378-382.
- [3] 胡紫航, 刘永奎, 何少云, 等. 爆破与切割开挖高边墙围岩稳定性分析[J]. 公路, 2022, 67(2): 334-337.
- [4] 陈志敏. 高地应力软岩隧道围岩压力研究和围岩与支护结构相互作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 648.
- [5] 朱永生, 褚卫江, 万祥兵, 等. 白鹤滩水电站地下厂房错动带围岩稳定性控制方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(1): 48-56.
- [6] 吴明先, 刘瑞辉, 王万平, 等. 地下水对深埋软弱围岩隧道初期支护结构破坏及其控制措施研究[EB/OL]. 公路, 2022(5): 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1668.U.20220504.1321.002.html>, 2022-05-05.
- [7] 张杰, 康小杰, 白文勇, 等. 近距离下煤层迎采掘进巷道围岩失稳特征与支护设计[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(4): 95-101.
- [8] 陈特, 邓云瑞, 谢道强, 等. 隧洞围岩稳定性及支护时机分析[EB/OL]. 水力发电: 1-5. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20220331.1017.004.html>, 2022-04-01.
- [9] 刘雨萌, 张俊儒, 何冠男, 等. 基于强度折减法的高铁隧道全断面机械化作业围岩稳定性分析及支护优化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 451-462.
- [10] 张新福, 朱磊, 潘浩, 等. 深部大采高沿空掘巷围岩变形破坏特征与控制[J]. 煤炭技术, 2022, 41(3): 52-57.